

DISEÑO PRELIMINAR DE SHAKER HIDRÁULICO DE 3 GRADOS DE LIBERTAD

J. Paladini ^a, N. Diaz ^(b), P. Bidinost ^(c), D. Britez ^(d), A. Patanella ^(e)

UIDET GEMA – Departamento de Aeronáutica – Facultad de Ingeniería –
Universidad Nacional de La Plata

Calle 48 y 116 – (1900) La Plata – Argentina

Email: ^a jlpaladini@gmail.com, ^b jnicolas.diaz91@gmail.com, ^c pablo.bidinost@ing.unlp.edu.ar,
^d diego.britez@ing.unlp.edu.ar, ^e ajpatane@ing.unlp.edu.ar

RESUMEN

El siguiente trabajo presenta el diseño preliminar de un shaker hidráulico de 3 grados de libertad para análisis de componentes de uso aeroespacial. En el mismo se presentan los análisis estructurales y dinámicos preliminares utilizados para definir los componentes principales del sistema y las capacidades del mismo. El conjunto de análisis fue realizado mediante simulaciones de elementos finitos, las cuales permitieron obtener frecuencias naturales, modos de vibrar y mapas de tensiones de componentes del sistema.

El diseño del shaker hidráulico de 3 grados de libertad se realiza a partir de la adaptación del diseño para un grado de libertad a 3 grados de libertad, modificando la configuración mecánica para permitir desplazamientos en el plano y una rotación en torno a la dirección normal al plano de desplazamiento. Esta adaptación implica la adición de componentes hidráulicos y modificación de los herrajes de los mismos para asegurar la máxima capacidad del sistema hidráulico en sus 3 grados de libertad.

Mediante el análisis de los resultados se pretende obtener una configuración mecánica inicial, definir componentes principales y condiciones de operación para luego realizar la ingeniería de detalle y control.

Palabras clave: Shaker, Hidráulico, Vibraciones

INTRODUCCIÓN

Los componentes y estructuras espaciales a lo largo de una misión se encuentran sometidos a vibraciones de distintas amplitudes y frecuencias, así como también a aceleraciones extremas. Los estados de carga críticos sobre estas estructuras y componentes se dan principalmente durante la fase de lanzamiento donde se experimentan las mayores aceleraciones y vibraciones, producto del empuje y excitación del motor, así como también de las maniobras. Por otro lado, en los lanzadores se pueden presentar fenómenos oscilatorios como pogo y sloshing que afectan directamente el sistema de propulsión de estos vehículos.

El diseño de este tipo de componentes debe ser controlado y verificado a fin de conocer la fiabilidad estructural a través de exhaustivas pruebas, tales como ensayos de calificación y aceptación. Estos ensayos deben tener objetivos y criterios de éxito claramente definidos. El ensayo debe ser representativo de las condiciones operativas. Las diferencias entre el ensayo y las condiciones de funcionamiento (por ejemplo, condiciones de contorno, gravedad, atmósfera) deben ser identificadas y sus efectos con respecto al ensayo deben ser evaluados.

Estos ensayos de verificación se utilizan para:

- Caracterizar las entradas básicas para el análisis.
- Estudiar el comportamiento de la estructura como parte del proceso de desarrollo.
- Proporcionar una base para chequear las hipótesis planteadas.
- Validar el modelo.
- Calificar la propuesta de diseño.
- Aceptar la estructura de vuelo.

Pueden llevarse a cabo diferentes tipos de ensayo tales como:

- Ensayos estáticos.
- Ensayos modales.
- Ensayos dinámicos.
- Ensayos acústicos.
- Ensayos de Fatiga y Fractura.

Los ensayos dinámicos a nivel estructural o a nivel del conjunto completo se realizan utilizando vibradores (shakers) impulsados con servo-actuadores hidráulicos que pueden soportar una elevada carga estática y dinámica con una respuesta de frecuencia hasta 100Hz. Un shaker hidráulico es una organización de elementos hidráulicos regulados a través de servo válvulas y actuadores de alta tecnología que impulsan las cargas dinámicas a una plataforma suspendida con dispositivos de baja fricción. Este tipo de dispositivo de ensayo y el hecho de disponer de varios actuadores hidráulicos permite cargar la estructura en diferentes condiciones simulando su vida en servicio, en general, la estructura a ensayar se coloca en la condición de vuelo. Estos sistemas al igual que los sistemas electrodinámicos permiten aplicar cargas con distintos tipos de señales.

El desarrollo de un shaker de 1 grado de libertad supone la etapa inicial de un desarrollo aún más ambicioso que consiste en la construcción de un vibrador de este tipo en 6 grados de libertad. La instancia siguiente representa el trabajo aquí expuesto, el cual es el desarrollo de un shaker de 3 grados de libertad a partir de la configuración mecánica obtenida en el primero.

METODOLOGÍA

El diseño del shaker parte de la necesidad de ensayar componentes de vuelo específicos en un rango de frecuencias acotado, determinado en parte por la disponibilidad tecnológica de los componentes que lo conforman. De esta manera, a partir del rango de frecuencias y la magnitud de las aceleraciones en las cuales se pretenden ensayar los componentes, se selecciona el sistema hidráulico que cumpla con estos requerimientos.

El sistema hidráulico y sus condiciones de operación permiten definir los límites de las condiciones de operación y sus componentes estructurales. De aquí se desprende el diseño de la mesa de prueba, el herraje de la misma y, posteriormente, los límites de operación del sistema.

El análisis de la capacidad del sistema hidráulico se realiza de manera analítica y es utilizado como entrada para el diseño estructural y dinámico de los componentes estructurales por medio de modelos de elementos finitos. Por último, la capacidad de operación del sistema surge de un análisis de los resultados obtenidos, los cuales deberán ser validados mediante ensayos de componentes individuales y del sistema en operación.

DESARROLLO

Configuración

Con el fin de disminuir el tiempo requerido para la puesta en servicio del shaker de tres grados de libertad, se decidió servirse de la mesa de ensayo que ya se encuentra diseñada y construida para el shaker de un grado de libertad. La misma es una pieza hueca reforzada con tabiques, de esta forma se obtiene una rigidez similar a la de una maciza pero con mucho menos volumen de material, obteniendo así una frecuencia natural mayor. El material con que se realizó la verificación del diseño de la mesa es aluminio, de esta forma se obtiene una mesa menos pesada que si fuera de acero, lo que resulta en que se puedan ensayar piezas de mayor masa.

La mesa está situada sobre una base que aloja bolas transportadoras permitiendo cualquier desplazamiento y rotación en el plano, el desplazamiento vertical se restringe por el peso de la mesa y los elementos de ensayo.

El tipo de vinculación utilizado requiere de un estudio de la limitación del shaker por el despegue que puede llegar a producirse entre la mesa de ensayo y las bolas (cabeceo) debido a un momento muy alto. Para poder controlar los tres grados de libertad deseados (dos traslaciones y una rotación en el

plano) se decidió posicionar cuatro actuadores hidráulicos en las cuatro esquinas de la mesa como se puede observar en la siguiente imagen (en rojo se resalta la zona de toma de los pistones):

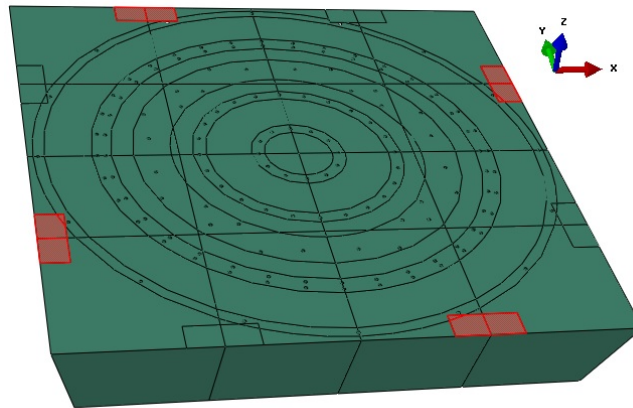


Figura 1. Configuración básica de la mesa.

Sistema Hidráulico

El sistema hidráulico se ve limitado por la máxima carga que pueden soportar los actuadores hidráulicos, el rango de frecuencias en el que puede trabajar el sistema de válvulas y el desplazamiento que admiten los actuadores para la frecuencia de ensayo. Se evaluaron las dos condiciones extremas de los actuadores: desplazamiento en dirección de uno de los ejes paralelo a dos actuadores y rotación pura.

Mesa de Ensayo

Modelo FEM

Se realizó un modelo de elementos finitos para poder realizar los cálculos de frecuencias, tensiones sobre la placa y cargas sobre los vínculos.

Se tomó la decisión de realizar la modelización de la mesa como una única parte *Shell*, ya que las dimensiones en el plano de las placas y los tabiques son mucho mayores que los espesores de los mismos. Además de esta manera se obtiene un ahorro de costo computacional ya que se utilizan menos elementos que si se modelizará como un sólido.

Como el diseño del shaker está pensado con las limitaciones de poder ensayar un tanque estructural de 1,5 metros de diámetro la placa superior es cuadrada de 2 metros de lado y la inferior de 1,5 metros de lado. Estas placas están unidas por los tabiques y un carenado que cierra la mesa y ofrece un aumento de resistencia a la torsión en el eje normal al plano.

El espesor de la placa superior es de 2 pulgadas para poder hacer en la misma los insertos de acero que permitan sujetar las piezas de ensayo a la mesa. Los tabiques y la placa inferior tienen un espesor de media pulgada ya que no recibirán roscas a excepción de la unión de la placa con los tabiques, pero allí los últimos tienen una aleta para dicha función. Para evitar el desgaste de la placa que se encuentra en contacto con las bolas transportadoras en corto plazo la placa inferior se encuentra unida mediante bulones a otra de acero inoxidable. Considerando la mesa completa se tiene una masa total de 1000 Kg.

Luego se realizó un mallado del modelo y se hizo una verificación del mismo para observar que no existan elementos distorsionados. También se realizó un recuento de la cantidad y tipo de elementos utilizados.

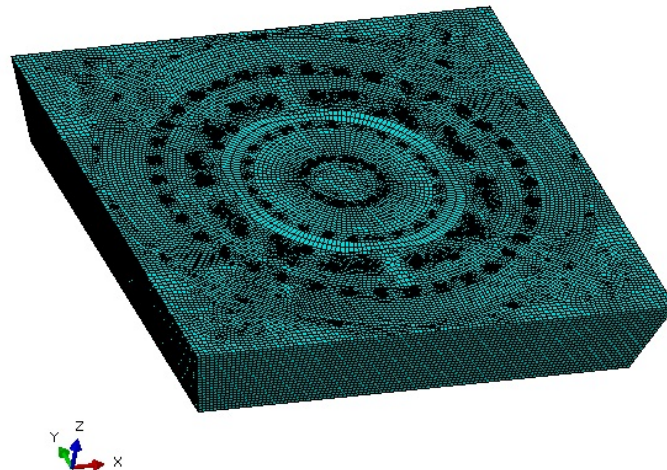


Figura 2. Modelo Mallado.

Tabla 1. Cantidad y Tipo de elementos y nodos.

Elementos	
Tipo	Cantidad
S4R	59767
S3	1616
Total	61383
Total Nodos	60117

Frecuencias

Tomando el modelo FEM anterior se procedió a realizar un análisis de frecuencias de la mesa para verificar que la frecuencia natural de la misma no esté por debajo de los 100Hz con el tipo de vinculación existente para las condiciones existentes en este shaker. También se verificó que los primeros modos de vibrar sean los esperados conceptualmente, de esta manera se puede saber que el modelo FEM realizado simula la realidad física.

Vinculación

Sabiendo que la frecuencia natural de la mesa se encuentra por encima del rango de ensayo requerido, se estudió las cargas que aparecen en las bolas transportadoras que ofician de vínculo y para qué momento la mesa comienza a desprenderse de las bolas y ocurre el cabeceo.

Para poder determinar la configuración de bolas transportadoras a utilizar se estudiaron con las unidades existentes en el mercado distintas disposiciones y cantidades. Se determinó que la cantidad óptima son 36 bolas transportadoras ubicadas en forma equidistante. De esta manera a pesar del desplazamiento de la mesa se tienen aproximadamente la misma cantidad de bolas en contacto y con la misma disposición.

En el modelo FEM se aproximó el contacto de las bolas con cuadrículas pequeñas, así se evita un aumento importante de la cantidad de elementos comparado con haber realizado un contacto con superficies esféricas del tamaño de las bolas.

Se calculó con una carga baja cual es la bola que se encontraría más cargada y se extrapola en forma lineal la carga que aparece en dicha bola en función de la masa de la pieza y la altura del CG de la misma respecto de la placa superior de la mesa. Posteriormente se verificó que la extrapolación se aproxime a la carga que recibe la bola mas cargada en el caso de que aparezca un momento mayor.

Para poder determinar los límites del shaker se calculó con qué momento ocurre el despegue de la mesa respecto de las bolas en función de una masa de ensayo dada. Para ello se tomo como criterio que el máximo despegue admisible sea un orden de magnitud más chico que la tolerancia de las bolas transportadoras que es de 0.2 milímetros.

Tensiones

Luego de verificar que la mesa puede utilizarse en el rango de frecuencias requerido y saber cuáles son los límites del shaker debido a la vinculación existe, se hizo un estudio de tensiones de la mesa para saber qué nivel de tensiones existen en la mesa en los casos de combinación entre desplazamiento y rotación extremos:

- Rotación pura.
- Desplazamiento puro.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Sistema Hidráulico

Suponiendo un desplazamiento puro en alguno de los ejes de simetría de la mesa, la curva envolvente de las capacidades de los actuadores hidráulicos a una frecuencia dada para la máxima velocidad pico de desplazamiento de 0.4m/s es la siguiente:

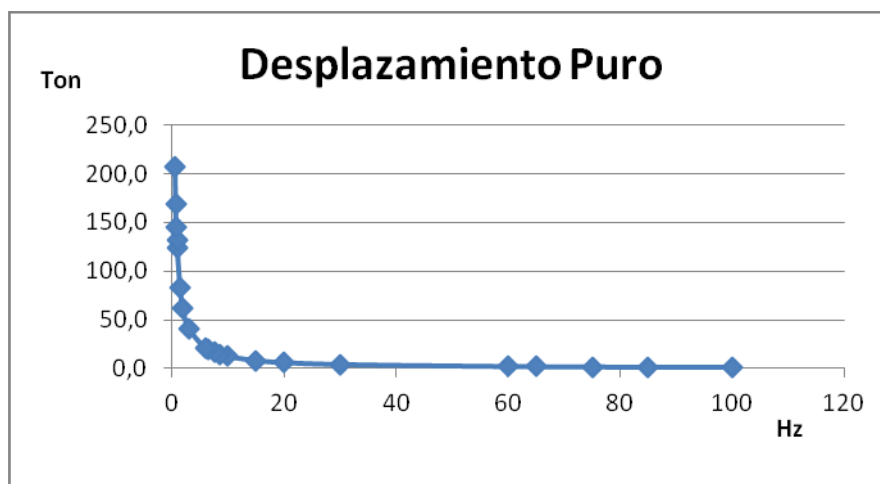


Figura 3. Masa VS Frecuencia en Desplazamiento.

Si se utiliza el shaker en una rotación pura se tiene la siguiente curva envolvente de frecuencias y masas para la velocidad de rotación máxima de 0.283rad/s:

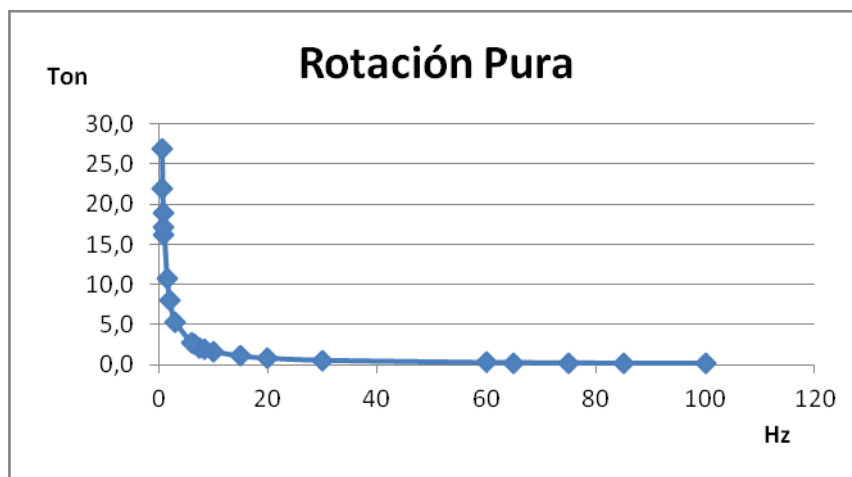


Figura 4. Masa VS Frecuencia en Rotación.

Mesa de Ensayo

Frecuencias

A continuación se expone el resultado del análisis de frecuencias realizado, como puede observarse la primer frecuencia natural (248.87Hz) se encuentra por encima de la máxima de operación del shaker.

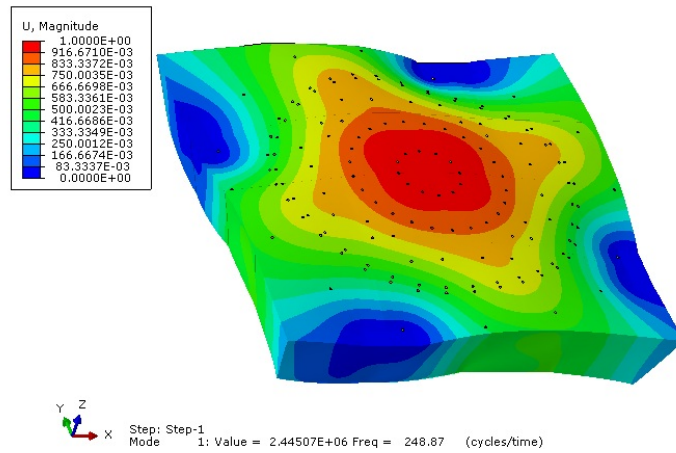


Figura 5. Primera Frecuencia Natural.

Vinculación

En la siguiente figura se puede observar las cargas sobre las bolas transportadoras en la simulación del ensayo del tanque estructural lleno a 1Hz con 0.25G de aceleración, que es la máxima que puede otorgar el sistema hidráulico a dicha frecuencia.

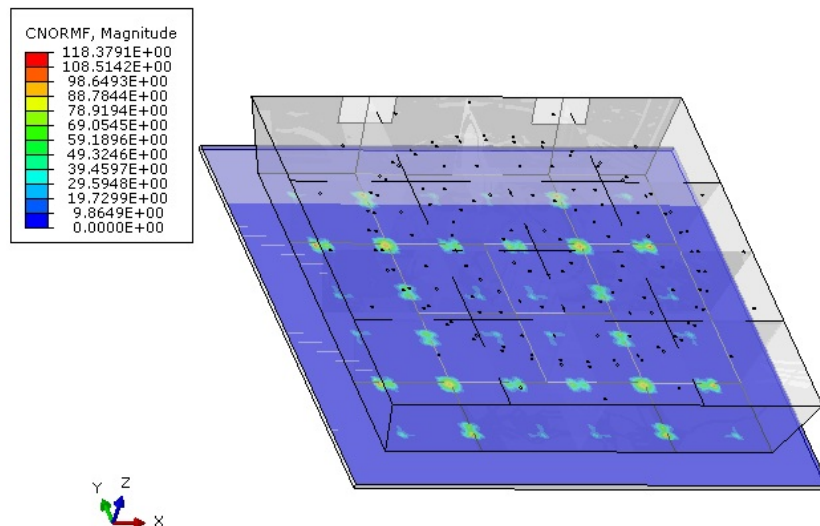


Figura 6. Modelo para cálculo de Reacciones.

Se obtuvo como resultado que las bolas soportaban el momento generado debido a las condiciones de carga. También se analizó el desplazamiento de los distintos puntos de la mesa de ensayo y se obtuvo que para el máximo momento soportado por las bolas no ocurre el despegue de la mesa.

Tensiones

A continuación se muestran las tensiones que aparecen sobre la mesa con una rotación pura en el plano.

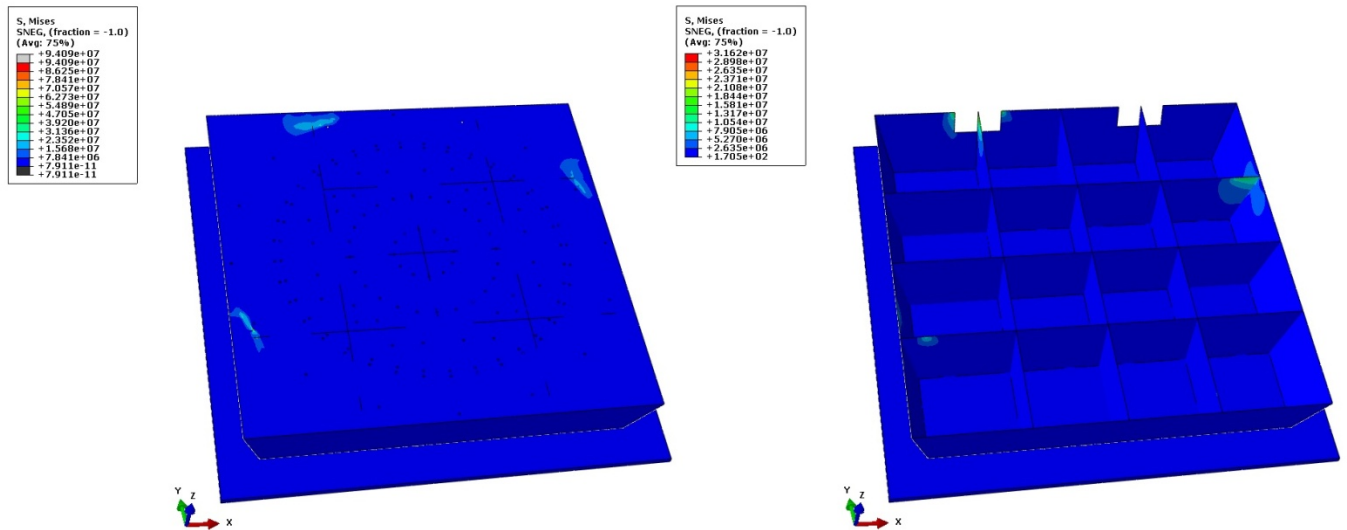


Figura 8. Tensiones sobre la mesa en rotación pura.

En el caso del desplazamiento puro se realizó un análisis de tensiones sobre la mesa con el máximo momento soportado por las bolas transportadoras.

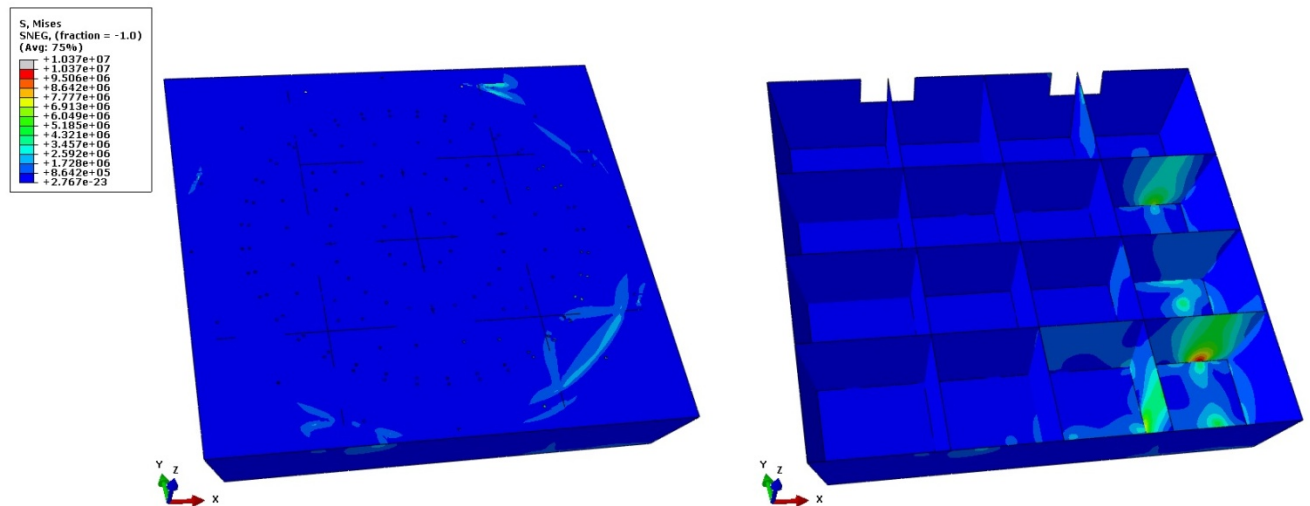


Figura 9. Tensiones sobre la mesa en desplazamiento puro.

CONCLUSIONES

- Se pudo calcular las cargas sobre los vínculos utilizados en el shaker de tres grados de libertad plano.
- Se pudieron verificar el orden de magnitud de las tensiones sobre la mesa.
- Se verificó que la frecuencia asociada al primer modo de vibrar de la mesa sea superior a la requerida para realizar ensayos.
- Se encontraron las capacidades del sistema hidráulico.

El estudio realizado nos permite concluir que es viable a utilización de la mesa diseñada para el shaker de un grado de libertad en una transformación a tres grados de libertad en el plano. Con los resultados de este trabajo se deberá comenzar la ingeniería de detalle del shaker.

Todos los resultados obtenidos deberán ser verificados con ensayos sobre componentes del sistema para poder validarlos.

REFERENCIAS

1. Allan G. Piersol, Thomas L. Paez: “Harris’ Shock and Vibration Handbook” (6th edition), 2010, Mc Graw-Hill (*Libro*)